

含分布式电源的智能电网的自愈控制与重构优化

随着近年来的能源危机以及智慧城市建设的深入,越来越多的分布式电源被接入电网,这些分布式电源不仅可以缓解环境保护的压力,还可以改善能源结构。然而,另一方面这些分布式电源的接入,对现有的电网也带来很多不利的影响,影响系统稳定运行,针对这些不良影响,对含分布式电源的智能电网展开了研究。为了实现智能电网的自愈控制,采用一种寻优能力与计算速度俱佳的模拟退火算法,建立了重构模型,并进行了仿真,验证了模型的有效性,同时证明分布式电源并网经过重构优化之后,可以有效地降低配电网损耗,提高供电电压质量。

项胤兴 吴文宣 林 韩 蔡金锭/国网福建省电力有限公司电力科学研究院



项胤兴/工程师

关键词/Keywords

分布式电源·
智能电源·
治愈控制·
重构优化·

近年来智慧城市的发展不断深入,智慧城市的各项应用也在不断地拓展,智能电网作为智慧城市的重要组成部分,取得了飞速的进步。智能电网是现代电网的重要发展方向,是指借助各种智能化的设备,通过先进的传感测量技术和控制方法,实现电网的安全、稳定和高效运行,同时要求电网具有一定的自愈功能,可以在很大程度上抵抗多种外力的冲击和破坏。

随着全球资源紧张、环境恶化等问题日益凸显以及传统的集中发电、远距离输电的电力系统存在负荷跟踪能力差、供电可靠性差等问题,太阳能、风能、海洋能和生物能等各种分布式电源被越来越多地并入电网。这些能源大多是清洁可再生能源,不仅可以降低环境污染压力,而且对于改善能源结构具有重要的意义,这些分布式能源与电力系统互联并且互为支撑,可以实现环境保护和节约能源的作用。图1为含有太阳能

发电、风力发电和柴油机发电等几种分布式电源的并网示意图^[1]。

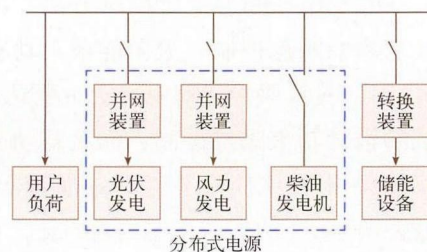


图1 多种分布式电源并网示意图

虽然分布式电源对于改善环境和能源结构具有积极的作用,然而,随着分布式电源的大规模接入,不可避免地给现有电网带来了多方面的冲击和影响,具体表现为以下几点:

1) 分布式电源的接入会使电网电压发生一定的变化,影响电网电压的稳定,严重情况下甚至会导致整个电网崩溃。

2) 分布式电源的接入会对电网的电能质量产生较大影响,当大规模分布式电源接入电网后,在引起电网电压波动和功率波动的同时,会引入大量的谐波干扰降低电网电能质量,对电网的负荷产生冲击和破坏。

3) 分布式电源的接入会对继电保护产生一定的影响,使原有的单电源继电保护变成多电源的供电形式,严重时会引起继电保护产生误动作或者失效,因此会影响配电网的故障处理。

4) 分布式电源的接入使得现有电网的结构更加复杂,增加了电力负荷预测和建模的难度,使得电网的规划难度更高,因此对电网的自愈控制和重构优化

提出了更高的要求^[2]。

智能电网治愈控制

智能电网治愈的概念首先是美国科学家提出的,在北美大停电事故之后,美国电科院启动了智能配电网工程,将电网的自愈控制作为智能配电网的最重要发展方向。智能配电网相比传统配电网应该更加稳定可靠,并且具有更大的弹性,不仅在正常状态下可以稳定运行,而且可以有效地抵御自然灾害及外力破坏等各种突发性的冲击,尤其是可以抵抗各种分布式电源大量接入给电网造成的影响。智能电网在抵抗住强大冲击的同时,还要具有强大的自愈功能,在冲击和破坏之后逐渐恢复自身功能。从功能上讲,自愈功能之于智能配电网,就相当于免疫系统之于人体。

智能配电网的自愈能力,是指电网能够自动、及时和准确地检测到电力故障,并通过开关的动作或电网的重构等一系列自我补救措施,使电网能够维持相对稳定的状态,不影响或尽量少影响用户的正常用电需求^[3]。而电网的重构优化是自愈控制中最关键的一项操作,尤其是当大量的分布式电源接入电网,为了实现电网的自愈,达到稳定运行,往往需要对电网进行重构优化。

含分布式电源的电网重构优化

1. 电网重构数学模型

含有分布式电源的配电网结构比较复杂,随着不同分布式电源的接入和退出,会对电网造成较大的影响和波动,需要对电网进行重构。

电网重构的目的主要体现在维持系统的电压、功率稳定和负荷平衡,提高系统的稳定可靠性,减小系统的能量损耗等。以上都成为配电网重构的优化目标,可见有多个目标,在实际的目标函数中会包含这些多个目标,每个目标所占的权重不同。一般为了简化计算,往往只取一个目标进行优化,本文取有功损耗最小作为优化目标,建立目标函数,表达式为

$$f(x)_{\min} = \sum_{k=1}^{n_l} n_k r_k \frac{P_k^2 + Q_k^2}{U_k^2} \quad (1)$$

式中, $f(x)_{\min}$ 为网络有功功率损耗的最小值; n_k 为支路 k 的开关状态, 0 代表支路关闭, 1 代表支路打开; r_k 表示支路 k 的电阻值; U_k 表示支路 k 两端的电压幅值; P_k 和 Q_k 分别为支路 k 的有功功率和无功功率。

除了目标函数以外,还需要设定具体的约束条件。约束条件很多,本文为了简便运算,约束条件包含潮流等式约束、网络拓扑约束、支路容量约束和节点电压约束等几个条件。具体表达如下。

(1) 潮流等式约束

$$S_{k-1} = S_k + S_{L_k} \quad (2)$$

式中, S_k 和 S_{k-1} 分别为支路 k 首末端母线的注入复功率; S_{L_k} 为母线 L_k 的负荷的复功率。

(2) 网络拓扑约束

网络拓扑应是无环、无孤岛的辐射状的网络拓扑结构。

(3) 容量约束

$$S_k \leq S_{k\max} \quad (3)$$

式中, $S_{k\max}$ 为支路 k 注入复功率的最大值,也就是其支路的容量限制。

(4) 节点电压约束

$$U_{L_k\min} \leq U_{L_k} \leq U_{L_k\max} \quad (4)$$

式中, $U_{L_k\min}$ 和 $U_{L_k\max}$ 分别为母线 L_k 两端电压的最小幅值和最大幅值。

2. 电网重构算法

电网重构是一个复杂的运算过程,涉及多目标的分线性运算,并且需要经过多次运算,通过不断地比较寻找最优值。为了达到良好的寻优效果和计算速度,出现了越来越多的重构算法,其中人工智能算法尤为突出。许多的人工智能算法,例如人工神经网络算法、粒子群算法、遗传算法和模拟退火方法等都已经电网重构领域进行了尝试和应用。

本文综合比较各种算法,采用模拟退火算法来实现对电网的重构优化。模拟退火算法,顾名思义其算法的原理是受固体退火启发,其原理是通过将固体充分加热之后,再让该固体慢慢冷却下来,加热的过程中,固体内的粒子会随温度

的上升而逐渐从有序状态变为无序状态，内能慢慢增大；而在冷却过程中粒子又逐渐从无序状态变为有序状态，最终稳定变为常温，达到平衡状态，内能减为最小。

这个过程中，能量的变化为

$$p = e^{\frac{-\Delta E}{KT}}$$
 (5)

式中， E 为温度 T 时的内能，则 ΔE 为内能的变化量； K 为玻尔兹曼常数； T 为温度； p 为总能量。

因此，模拟退火算法的实现过程是：由设定初始解和控制参数初值开始，然后对当前解不断重复“产生新解→计算目标函数差→选择接受或舍弃”的迭代过程，并逐步衰减 t 值，算法终止时的当前解即为所得的最优解。因此，模拟退火算法可以有效地避免搜索过程陷入局部优化解，从而有利于寻找全网的最优解^[4]。

所以，将电网的拓扑结构看作是粒子所处的状态，将电网拓扑的目标函数看作是粒子所处状态的能量，这样就可以将模拟退火算法方便地应用于配电网的重构优化。其实现的流程图如图2所示。具体流程如下：

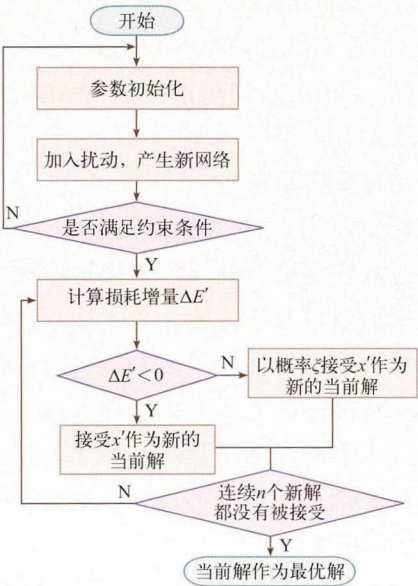


图2 模拟退火算法工作流程示意图

- 1) 系统参数初始化，初始温度等参数，以初始网络结构作为当前的优化解和最优解。
- 2) 产生随机扰动，即相当于接入分布式电

源，产生了新的网络拓扑。

3) 判断新的网络拓扑是否满足网络约束条件，如果不满足，返回上一步，生成新网络；如果满足，则进行下一步，计算网络的损耗值。

4) 计算增量 $\Delta E' = f(x') - f(x)$ ，其中 $f(x)$ 为评价函数。

5) 若 $\Delta E' < 0$ ，则接受 x' 作为新的当前解；否则以概率 $\xi = e^{\frac{-\Delta E'}{T}}$ 接受 x' 作为新的当前解。

6) 如果满足连续 n 个新解都没有被接受的终止条件，则当前解就作为最优解，程序运行结束。

模拟退火算法与初始值的选取无关，算法经过大量的随机迭代最后求得的最优解与初始解状态无关；模拟退火算法具有渐近收敛性，是一种以概率1收敛于全局最优解的优化算法，同时模拟退火算法具有并行性的特点^[5]。

测试验证

此模型采用IEEE-33节点系统，进行仿真计算，来验证模拟退火算法在含分布式电源的智能电网重构优化的应用效果。

本文选取了3个不同容量的分布式电源并入电网，分别在节点2、8和12处加入，则含分布式电源的IEEE-33节点系统结构图如图3所示。

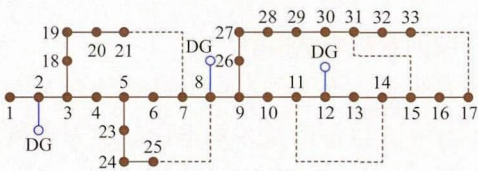


图3 含分布式电源的IEEE-33节点系统配电网络系统示意图

通过对含分布式电源的IEEE-33节点标准算例进行仿真，得到重构结果如下表所示。

表 加入分布式电源后重构结果

指标	重构前	加入分布式电源重构后
打开的开关	7-21	7-8
	8-25	8-9
	11-14	11-12
	15-31	15-16
	17-33	16-17

(续)

指标	重构前	加入分布式电源重构后
电压最低节点	17	17
最低点电压值 (pu)	0.917	0.958
网路损耗率 (%)	6.2	2.5

图4为系统重构前和加入分布式电源之后重构网络的各节点电压结果比较。

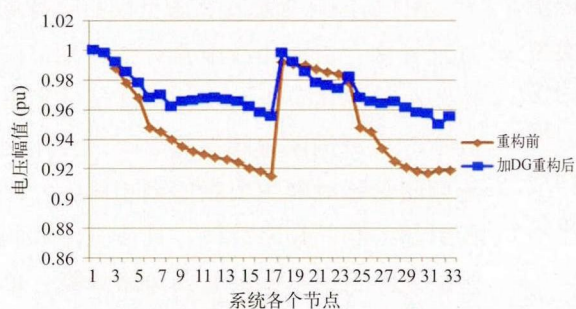


图4 系统加入分布式电源重构之后的各节点电压

由上表和图4,可以得到以下结论:

1) 加入分布式电源之后,系统的网络结构发生了变化,开关状态发生了变化,重构前7-21、8-25、11-14、12-22、15-31和17-33 打开,加入分布式电源之后重构后,为7-8、8-9、11-12、15-16和16-17打开。

2) 开关状态的改变使网络结构发生变化,使得网络损耗有了明显降低,网损率相比重构前降低了3.7%,说明分布电源并网重构之后可以有效地降低配电网有功网损。

3) 电压最低点电压由重构前的0.917提升到0.958,说明系统的末端电压得到了很大的改善。

4) 除了最低节点,各节点电压都有了明显提高,说明分布电源并网重构之后可以明显提高供电电压质量。

通过这个算例仿真验证了本文所采用的模拟退火算法建立的重构模型的有效性。

结束语

分布式电源并网是随着智慧城市建设与现代电网技术发展的必然趋势,对于节能减排,改善能源结构具有重要的意义。针对分布式电源并网造成的一些影响,本文对含分布式电源的智能电网网络重构问题进行了研究,采用模拟退火算法建立重构优化模型。由仿真结果可以看出,分布式电源并网经过重构优化之后,可以有效地降低配电网损耗,提高供电电压质量,提升电网电能质量。本文的研发方法,对以后电网配置优化有一定的参考作用。

参考文献

- [1] 王倩. 含分布式电源的配电网重构 [D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [2] 董旭柱. 智能配电网自愈控制技术的内涵及其应用 [J]. 南方电网技术, 2013, 7(3): 1-6.
- [3] 战杰, 肖静, 赵义术. 分布式电源和微网在智能配电网自愈功能中的作用分析 [J]. 山东电力高等专科学校学报, 2010, 13(2): 33-36.
- [4] 谢红艳. 基于并行模拟退火算法的VRP问题研究 [J]. 物流技术, 2010(8): 67-69.
- [5] 聂耸. 含分布式电源的智能配电网分析与重构 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [6] 刘畅, 黄民翔. 含多种分布式电源的配电网重构优化研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 4(16).

(收稿日期: 2015-02-10) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告